DOI：10.14005/j.cnki.issn1672-7673.20230627.001

利用测地观测中搭载式相位参考模式观测射电星 Del Lib 和 HR 1099

陈　文[1,2,3]，汪　敏[1,3]

（1. 中国科学院云南天文台，云南 昆明　650216；2. 中国科学院大学，北京　100049；
3. 中国科学院天体结构与演化重点实验室，云南 昆明　650216）

摘要：基于盖亚(Gaia)天体测量数据建立的盖亚天体参考系(Gaia Celestial Reference Frame，GCRF)与基于甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry，VLBI)建立的国际天球参考系(International Celestial Reference Frame，ICRF)具有一定的系统差异，需要对盖亚的数据进行外部的独立评估，以建立光学和射电参考架连接。国际上对参考架的连接普遍采用在光学和射电波段都有辐射的天体，在暗端(星等 $G \geqslant 15$)使用类星体,在亮端($G \leqslant 13$)使用射电星。由于普通 VLBI 观测申请批准的周期长，难度大，因此，我们尝试将一部分射电星的观测转向数量较多的测地观测，在测地观测中搭载相位参考模式来观测射电星。为了测试这种观测的可行性，我们在 IVS(The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry)和 LBA(Large Baseline Array)的测地观测中搭载相位参考观测，选取 Del Lib 和 HR 1099 作为实验的目标源。观测得到了这两颗射电星的 VLBI 图像、流量和单历元坐标，且坐标精度高于前人；同时结合前人的数据，对这两颗射电星进行了视差和自行拟合，结果与前人和盖亚的结果相符，且部分精度更高。验证了测地模式中搭载相位参考观测射电星的可行性，为后续丰富射电星 VLBI 天体测量样本，连接光学与射电参考架奠定了一定的基础。

关键词：甚长基线干涉测量；射电星；天体测量；自行；视差

中图分类号：TN216　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7673(2023)05-0412-09

盖亚光学卫星最新数据 DR3(Data Release 3)已经发布[1]。然而，人们发现 DR3 的视差随所处天区、天体角径大小、星等和颜色的不同而存在一定的系统误差，基于盖亚类星体的数据(理论上河外源视差应为 0)得到的平均视差 0 点误差约为−29 μas[2]，且基于盖亚天体测量数据建立的盖亚天体参考系与基于甚长基线干涉测量建立的国际天球参考系有微小的差异[2]，因此需要对盖亚的数据进行外部的独立评估，以期建立光学和射电参考架连接。

国际上对参考架的连接普遍采用在光学和射电波段都有辐射的天体，在暗端(星等 $G \geqslant 15$)使用类星体,在亮端($G \leqslant 13$)使用射电星。尽管目前可用于参考架连接的射电星(100 颗左右)的数目远小于类星体(数千颗)，然而与类星体相比，射电星大多位于星等的亮端，具有更高的天体测量精度，且不存在如类星体大尺度喷流的影响[3-4]，因而更适合作为光学亮端和射电波段天球参考架连接的目标。目前可用于参考架连接的射电星中约 40 颗的射电天体测量参数(主要包括位置、视差和自行)来自于上世纪的观测，精度相对较低[5]。为了更好地实现光学与射电波段天球参考架的连接，必须在盖亚服役期间增加具有 VLBI 天体测量参数的射电星数目，从而避免由于观测历元不一致引入的误差。因此，尽快开展大规模的射电星甚长基线干涉测量尤为重要。

基金项目：国家自然科学基金（11903079，U2031212）资助.
收稿日期：2023-04-17；修订日期：2023-05-05
作者简介：陈　文，男，博士研究生，主要研究射电星及其他天体的 VLBI 观测. Email：chenwen@ynao.ac.cn.

由于普通甚长基线干涉测量观测申请批准的周期长，难度大，大批量的射电星观测需要耗费较长时间，因此可以将一部分射电星的观测转向观测频繁、数量较多的大地测量观测，在测地观测的空隙穿插射电星的相位参考观测。为了测试测地模式中相位参考观测对于流量较弱的射电星观测的可行性，我们尝试在 IVS 和 LBA 的测地观测中加入一些扫描来观测射电星，这就是搭载式相位参考观测。结合测地观测计划，我们选取在观测当天各台站均可见，且俯仰较合理的射电星 Del Lib 和 HR 1099 作为实验的目标源。

Del Lib 全称 δ Librae，又名 HR 5586，HD 132742 或 HIP 73473，是天空中第 3 亮($m_v = 4.91$)的 Algol 型掩食双星[6]。它由一颗温度较高的 B8 V 型主序星和一颗温度较低且质量较小的 K2 IV 型亚巨星组成，且这颗较小的亚巨星充满了它一侧的洛希瓣，物质正在从这颗亚巨星转移到主序星[7]。该双星系统轨道周期约为 2.33 天[7]。文[8]指出，该 Algol 系统是一个具有长周期轨道的三体系统，第 3 个成分为 F1 IV 型星。Del Lib 的射电耀斑爆发似乎存在一个大约 50 天的周期[7]。

HR 1099 又名 V711 Tauri，HD 22468 或 ADS 2644A，文[9]和文[10]在 1976 年各自分别用光谱和光度测量观测到了 HR 1099，并且确定其为 RS CVn(RS Canum Venaticorum)型近密双星，由一颗 K1 IV 型亚巨星和一颗 G5 IV-V 型主序星组成[11]，轨道周期约为 2.84 天[12]。较冷的 K1 型星比另一颗更活跃，在其色球层、过渡区和日冕中具有高温物质明亮发射的特征[13-14]。该双星系统的轨道倾角大约为 30°[11]，该 RS CVn 系统也是一个具有长周期轨道的三体系统，第 3 个成分 ADS 2644B 角距离大约为 6″，据推测对 RS CVn 系统的物理影响很小[12]。

1 观测安排

我们的观测分为两次，分别为 IVS 和 LBA 的测地观测。表 1 列出了两次观测的代码、时间、频率设置和参与台站等信息，表 2 列出了两次观测的参考源信息。测地观测一般为了减少数据量而仅使用右旋，所以第 3 节中数据结果图像也仅有右旋偏振。

表 1　观测配置信息

Table 1　Setup of the observations

Project code	Date (yyyy-mm-dd)	ν_{obs} /GHz	Data rates /Mbps	Duration /h	Station code
AOV010	2016-07-27	8.40	1 024	4	HO, IS, K1, KE, KM, KG, PA, SH, T6, TS, UR, WW, YG
V515C	2018-07-19	8.60	1 024	10	BD, HH, KM, SH, SV, ZC

注：两字母代表台站缩写：Hartrao(HO)，Ishioka(IS)，Kashim11(K1)，Kunming(KM)，Koganei(KG)，Parkes(PA)，Sheshan(SH)，Tianma65(T6)，Tsukub32(TS)，Urumqi(UR)，Warkworth12m(WW)，Yarra12m(YG))，Badary(BD)，Hartebeesthoek(HH)，Svetloe(SV)，Zelenchukskaya(ZC)。

表 2　射电星和它们对应的参考源(坐标为观测纲要文件 VEX 中使用的)

Table 2　Radio stars and their corresponding calibrators (coordinates used in VEX files)

Star name	Calibrator name	R. A. (h m s)	Dec. (° ′ ″)	Separation/(°)	Project code
Del Lib	1454-060	14 56 41.39331	-06 17 43.2601	2.47	AOV010
HR 1099	CTA 26	03 39 30.9378	-01 46 35.804	2.46	V515C

IVS 的观测代码为 AOV010，该测地项目是亚太地区大地测量及天体测量的一次观测，于 2015 年开始[15]，主要参与国包括澳大利亚、新西兰、日本和中国。AOV010 的观测波段在 S/X 波段，为了获得更高的空间分辨率，我们仅使用 X 波段的 8.4 GHz 数据，单通道带宽 16 MHz，其中台站 Kashim11

和 Koganei 只有 8 200 MHz 到 8 600 MHz 的窄带 X 波段，总数据记录速率为 1 024 Mbps。本次观测的主要目的除使用测地模式观测一组天体测量源外，还搭载了对于目标射电星 Del Lib 和其参考源 1454-060 的相位参考模式观测，两者角距为 2.47°，来测试相位参考模式能否观测到较弱的射电星。我们将 Del Lib 和其参考源 1454-060 的扫描长度各设置为 2 min，然后充分利用该测地观测的时间安排空隙，将 Del Lib 的相位参考扫描分为 3 部分，每部分长度大约 30 min，两部分间隔至少为 1 h，以便获得更好的 UV 覆盖，最终 Del Lib 的总时间约为 36 min，时间跨度约为 4 h。

LBA 的观测代码为 V515C，也是测地类观测，搭载了针对射电星 HR1099 的相位参考观测，观测频率为 S/X 波段。我们仅使用 X 波段的 8.6 GHz 数据，单通道带宽 16 MHz，2 比特量化，总数据记录速率为 1 024 Mbps。我们使用强射电源 CTA 26 作为参考源，目标源 HR 1099 和其参考源之间的角距为 2.46°。HR 1099 的扫描长度为 180 s，CTA 26 的扫描长度为 60 s。本次观测虽然是 LBA 组织的，但参加台站除了中国的云南昆明站 40 m 天线(KM)和上海佘山站 25 m 天线(SH)外，还有俄罗斯应用天文学研究所的 BD，SC 和 ZC 天线，以及南非的 HartRAO 26 m 天线(HH)，基线长度远大于仅在澳大利亚本土的观测，空间分辨率相较于常规 LBA 更高。HR 1099 的时间(On-source)约为 75 min，总观测时间也分为 3 部分，时间跨度约为 10 h。

2 数据处理

IVS 的观测数据由上海天文台相关处理中心[16]进行相关处理，LBA 数据由 ATNF(Australia Telescope National Facility)的 DiFX 相关机[17-18]进行相关处理。首先我们将相关后的数据装载进 VLBI 数据校准软件 AIPS(Astronomical Image Processing System[19])。

一般情况下测地观测同时使用 S/X 两个波段，为了获得更高的空间分别率，我们仅需要频率较高且信噪比较高的 X 波段数据，因此需要运行 AIPS 脚本 vlbautil，使用 vlbafqs 命令将 S 和 X 波段的数据分割，仅保留 X 波段数据；然后运行 ANTAB 任务载入台站 antab 文件，进行幅度校准。

经过星位角改正、电离层改正和地球定向参数(Earth Orientation Parameters，EOP)改正后，对于 AOV010，我们对该次观测中各台站都有条纹、流量较强的一颗源 0454-234，求解仪器时延；然后对相位参考观测校准源 1454-060 进行全局条纹拟合，将解代入目标源 Del Lib。在此步骤中，我们发现由于昆明站(KM)相位跳动非常大(可能是观测时台站设备出现相位或时间跳动[20])，导致条纹拟合求解运算时失败的解非常多，经过多次尝试后，我们将此步骤分为两步：(1)在去除昆明站的情况下对其他所有台站进行条纹拟合；(2)在上一步解的基础上，仅对昆明站进行条纹拟合，然后将两步的解叠加应用到目标源 Del Lib 上，最后导出校准完毕的数据。

与 AOV010 初始处理步骤类似，在完成星位角、电离层和地球定向参数改正后，对于 V515C 观测，首先对校准源 CTA 26 进行全局条纹拟合，将解应用到目标源 HR 1099，然后将 AIPS 校准完毕后的数据，导入 VLBI 图像处理软件 DIFMAP[21]，对校准源 CTA 26 进行成像。图像显示它并非点源，具有明显单侧喷流结构，见图 1(a)。所以我们将 DIFMAP 生成的图像模型 FITS 文件，导入 AIPS，使用 AIPS 任务 CALIB 进行两次迭代，以减少校准源复杂结构的影响(Del Lib 的校准源 1454-060 的图像显示其结构较为紧凑，见图 1(b)，不需要此步骤)，AIPS 校准完成，导出文件。

如果台站在观测时能够正常测量系统温度和增益，则观测完毕后，台站会生成各自的 antabfs 文件，然后上传至相关处理中心，各台站的 antabfs 文件整合在一起，生成包含所有台站系统温度和增益信息的 antab 文件，供数据处理人员下载使用。由于我们观测时的部分台站没有系统温度信息，因此在 AIPS 中进行幅度校准时，需要手动编辑 antab 文件。我们可以根据每个天线的标称系统温度计算单位流量密度(Degree Per Flux Unit，DPFU)，编辑 antab 文件，然后再通过 AIPS 任务 APCAL，手动进行幅度校准。

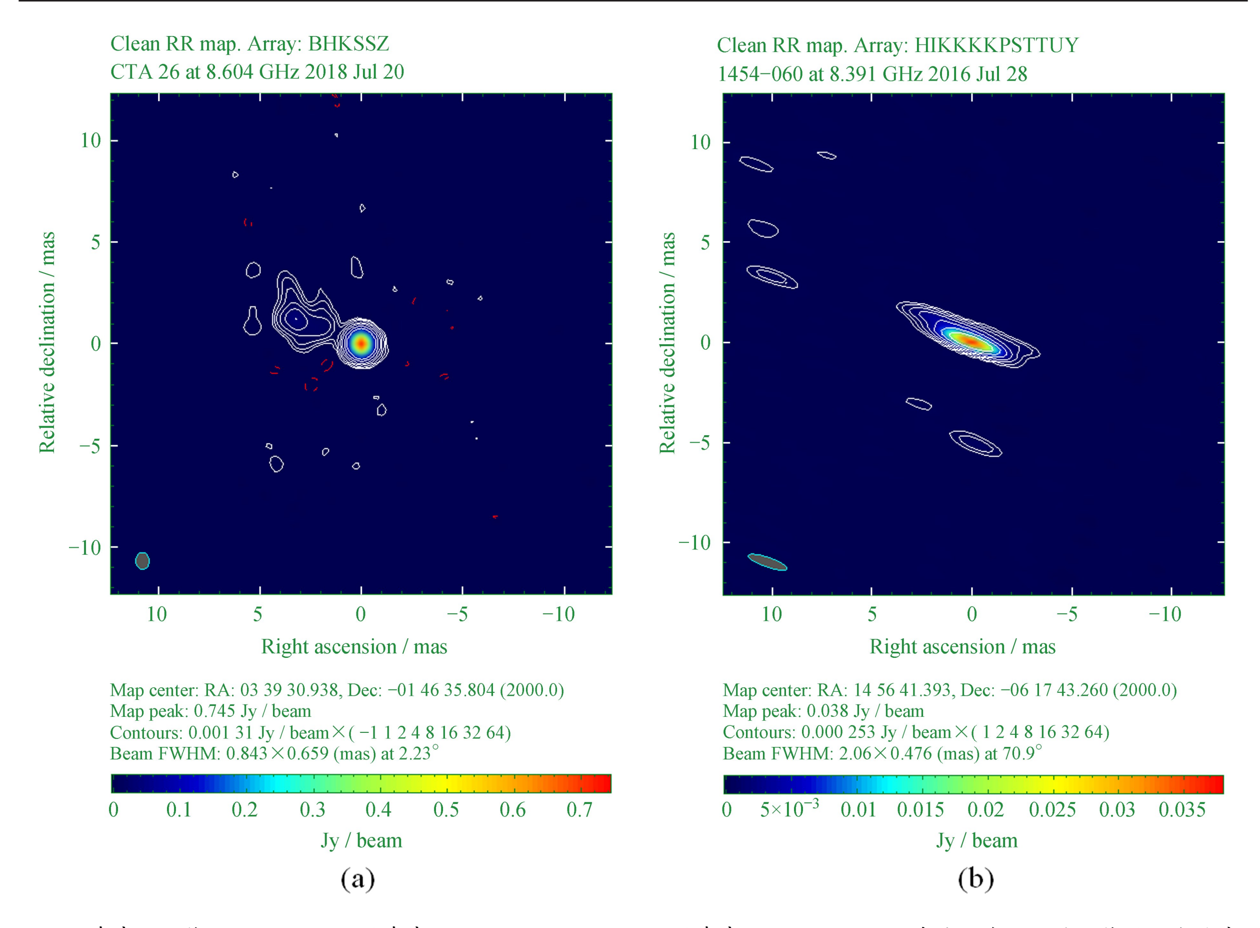


图 1　参考源图像。(a)HR 1099 的参考源 CTA 26；(b)Del Lib 的参考源 1454-060。图中左下角椭圆为图像的综合波束

Fig. 1　Images of the calibrators. (a) The calibrator CTA 26 of HR 1099; (b) the calibrator 1454-060 of Del Lib; the synthesized beam is shown in the bottom left corner of each image

我们从 IVS 或 LBA 的网站下载了部分台站的 antab 文件，对于缺少信息的台站，我们手动添加形如“081 08:47:52 600 600”的文本到 antab 文件中，即“观测当天在该年中的天数-当天时间(UTC)-左旋系统温度-右旋系统温度”(本文中仅编辑右旋数据)。系统温度 T_{sys} 可以通过公式 $SEFD=T_{sys}/DPFU$ 计算，各个天线的标称 *SEFD*(或 T_{sys})可以通过查询 IVS 和 LBA 官网得到。在 AIPS 中导入 antab 文件后，将 antab 文件中单一时刻的系统温度通过 APCAL 任务应用到完整的观测时段。将 AIPS 校准完成后的参考源数据导入 DIFMAP，再次进行幅度校准，运行 gscale 命令后，根据结果，再次修改刚才步骤中的 antab 文件：运行 gscale 后结果的值是各台站每通道名义 *SEFD*(根据 antab 文件里的 *DPFU* 和“*FT*”值计算得到)的平方根，若要改正 antab 文件中的“*FT*”值，需要对 gscale 结果中各通道值分别求平方，取中位数后更新到“*FT*”值上，从而可以将 gscale 的值修正到 0.9~1.1，以此校准各台站的幅度信息。此步骤经过 2~4 次迭代，可以将各个台站 gscale 值修正到 1 附近，至此幅度校准完毕。上述幅度校准过程中各台站系统温度信息仅为大致估算，所以不能精确得到目标源的流量信息，但具有一定的参考价值。

我们分别将 AIPS 校准完毕后的文件导入 DIFMAP，对两颗射电星进行成图，使用自然权得到两颗射电星的图像。

3　结果分析及讨论

3.1　图像结果分析

图 2(a)为射电星 Del Lib 的 IVS 搭载式相位参考观测的图像结果，由于射电星 Del Lib 的源跟踪时

间仅有 36 min 左右，总时间跨度约为 4 h，可以看到图像左下角的波束形状，整体呈现扁椭圆，UV 覆盖东西方向较差，南北方向较好，导致东西方向分辨率较差，所以图像的旁瓣效应很明显。表 3 列出了 Del Lib 的单历元坐标和误差，表中赤纬方向形式误差较大。文[8]的观测显示，该射电星在 8.3 GHz 的宁静阶段流量约为 1 ~ 10 mJy，爆发阶段的耀斑流量达 20 mJy，最高达到 34 mJy。我们在 8.4 GHz 频率通过粗略 antab 幅度校准测得的流量约为 1 mJy，图像光束尺寸为 2.38 × 0.51 mas。

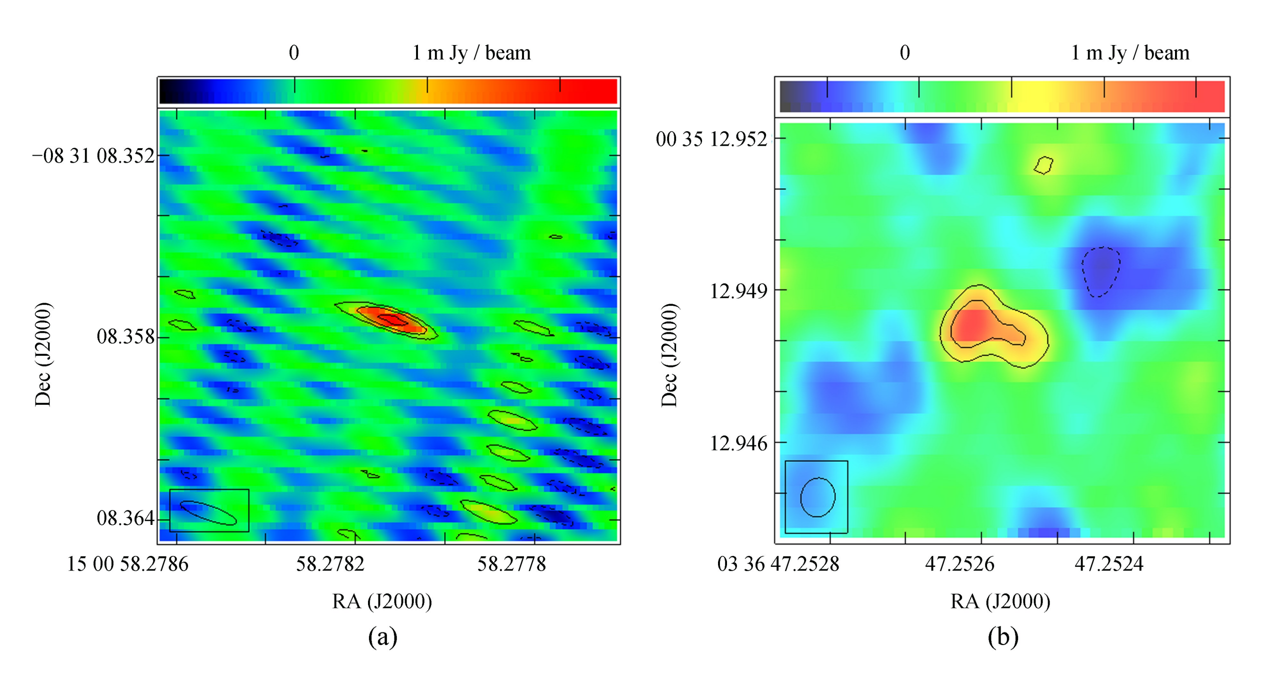


图 2 射电星图像。(a)为 Del Lib，(b)为 HR 1099；轮廓开始于 3 倍的图像均方根，增长因子为 2；图中左下角椭圆为图像的综合波束

Fig. 2 Images of the radio stars. (a) Del Lib, (b) HR 1099; contours start at three times of the noise level of images and increased by factors of 2; the synthesized beam is shown in the bottom left corner of each image

图 2(b)为射电星 HR1099 的图像结果，可以看到一个明显的左边成分较大、右边成分较小的相接结构。文[22]和文[23]提出可以用核晕(core-halo)结构描述。文[12]指出，HR 1099 的 VLBI 图像结构呈现左大右小的两个相接在一起的成分，呈东西方向，角距约为 1.7 mas，他们在形态学上将这个“envelope”称为“双核晕”或“核晕”结构。我们的 VLBI 图像结果也呈现“核晕”结构，呈东西方向，角距约为 2 mas，与前人结果相符。前人的观测表明该系统的流量非常强且变化很大。该射电星在宁静阶段的流量水平在 5~25 mJy(4.86 GHz)[24]。在爆发阶段，HR1099 的射电流量在数小时内发生显著和快速的变化，有两次在 1 天内从大约 100 mJy 增加到 1 Jy[23,25]。RS CVn 双星系统的射电发射通常认为是来自延展磁场结构中的弱相对论电子的同步辐射[26]。经 antab 粗略幅度校准后，我们观测的 HR1099 在 8.6 GHz 频率的流量大约为 5.4 mJy，也与前人的观测相符[24]，图像光束尺寸为 0.83 × 0.71 mas，HR 1099 的源跟踪时间约为 75 min，总的时间跨度约有 10 h，UV 覆盖较好，为成功探测到“核晕”结构提供了有利条件。

两颗射电星的亮温度可由公式

$$T_{\mathrm{b}} = 1.22 \times 10^{9} \frac{S_{\mathrm{obs}}}{\nu_{\mathrm{obs}}^{2} \theta_{1} \theta_{2}} (1 + z) \tag{1}$$

计算[27]，其中，S_{obs}是观测目标的总流量，单位为 mJy；ν_{obs}是观测频率，单位为 GHz；θ_1和 θ_2是目标图像高斯椭圆模型的半功率全宽的长轴和短轴，单位为 mas；z 是红移，因为目标在银河系内，所以此处为 0。由(1)式估算得到 Del Lib 的亮温度约为 2×10^7 K，HR 1099 的亮温度约为 5×10^7 K，两者均为非热辐射[28-29]。

3.2　坐标结果分析及视差自行拟合

表 3 给出了两颗射电星单历元坐标和图像信噪比等信息，其中坐标误差是由 JMFIT 给出的形式误差。表 3 最后一列 $\sigma_{\rm position}$ 为射电星的整体定位精度(位置误差)，可由经验公式

$$\sigma_{\rm position} = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{\theta}{\sqrt{8\ln 2}} \frac{\sigma_{\rm s}}{S} \tag{2}$$

给出[30]，其中，θ 是波束宽度的半功率全宽；$\sigma_{\rm s}$ 为流量的均方根；S 为图像上流量峰值，也即 $\frac{\sigma_{\rm s}}{S}$ 为信噪比的倒数 $\frac{1}{SNR}$，则(2)式经过化简后可以写为 $\sigma_{\rm position} \approx 0.5\frac{\theta}{SNR}$。

表 3 同时给出了前人得到的这两颗射电星单历元坐标和精度。对比可以发现，我们的精度要比文[31-32]的高一个量级，原因可能是由于我们观测的基线相比于 VLA + PT(Very Large Array + Pie Town)要长得多。

表 3　目标射电星的坐标等信息

Table 3　The coordinates of the radio stars and other information

Star name	R. A. (h m s)	Dec. (° ′ ″)	σ_α /mas	σ_δ /mas	Date /year	Project code/ Data from	SNR	Flux /mJy	Beam size /mas	$\sigma_{\rm position}$ /mas
Del Lib	15 00 58.2781083	−08 31 08.356379	0.07	0.26	2016.57203	AOV010¹	9.3	1.0	2.38 × 0.51	0.08
	15 00 58.3456	−08 31 08.219	13	18	2000.9426	D. Boboltz²	37.5	1.4	—	—
	15 00 58.3328	−08 31 08.248	7	11	2003.6933	D. Boboltz³	—	—	—	—
HR1099	03 36 47.2525923	+00 35 12.948236	0.07	0.05	2018.54817	V515C¹	14.0	5.4	0.83 × 0.71	0.03
	03 36 47.2869	+00 35 15.772	5	5	2000.9426	D. Boboltz²	204.1	13.5	—	—
	03 36 47.2457988	+00 35 12.688260	0.02	0.04	2020.01545	S. Lunz⁴	—	—	—	—

注：¹数据来自本文，目标射电星的绝对坐标及误差由 AIPS 任务 JMFIT 得到，误差仅为形式误差；信噪比和流量由 DIFMAP 得到；波束宽度为图像的综合波束大小；²数据来自文[31]的 VLA+PT 观测；³数据来自文[32]的 VLA+PT 观测；⁴数据来自文[33]的 VLBA 观测。

表 4 给出了我们结合前人数据使用最小二乘法拟合得到的自行和视差，表中还列出了 Gaia DR3[1]和文[31-32]的结果作为对比，后者由于数据量不足，仅有自行结果。尽管文[31-32]的数据为多历元观测，但并没有给出具体每一个历元的数据，因此我们只能使用文中的单一历元数据进行视差拟合。

表 4　自行和视差拟合结果及对比

Table 4　The fitting results of proper motions and parallaxes and comparison

Star name	Π/mas	μ_x/(mas · year^{-1})	μ_y/(mas · year^{-1})	Data from
Del Lib	10.101 ± 8.006	−63.671 ± 0.419	−4.922 ± 1.021	AOV010+D. Boboltz[31-32]
	—	−66.16 ± 1.51	−6.19 ± 1.62	D. Boboltz[32]
	9.282 ± 0.473	−63.051 ± 0.385	−6.024 ± 0.326	Gaia DR3[1]
HR 1099	34.611 ± 0.174	−31.677 ± 0.076	−161.628 ± 0.040	V515C + D. Boboltz[31] + S. Lunz[33]
	—	−31.87 ± 0.41	−161.09 ± 0.52	D. Boboltz[31]
	33.753 ± 0.087	−32.894 ± 0.131	−161.772 ± 0.118	Gaia DR3[1]

视差为 Π，自行为 $\mu_x = \mu_\alpha \cos\delta$ 和 $\mu_y = \mu_\delta$。

我们使用 3 个点(AOV010 加上 D. Boboltz 的 2 个点)对 Del Lib 进行视差自行的拟合，结果显示，我们拟合的 Del Lib 自行在 x 方向与 Gaia DR3 结果和精度都非常吻合，y 方向结果略有差异，但也在误差范围内；Del Lib 的视差 Π 误差较大，可能是由于文[31-32]的数据精度较低导致的；我们的 Del Lib 拟合结果的精度均高于文[31-32]。

我们使用 3 个点(V515C 加上文[31-32]和文[33]各 1 个点)对 Del Lib 进行视差自行的拟合。结果显示我们拟合的 HR 1099 自行与文[31-32]和 Gaia DR3[1]的结果都相符，且精度要高一个量级；视差 Π 在数值上与 Gaia DR3[1]相符，但误差要高一倍。

4 总结和展望

我们利用测地模式中搭载的相位参考观测，使用不长的观测时间得到了目标射电星的 VLBI 图像、流量和单历元坐标，然后结合前人的数据，使用最小二乘法拟合得到了它们的自行和视差，与前人的结果相符，并且提高了一定的精度。由于测地观测仅有右旋数据，因此，如果为了研究射电星的左右旋偏振等其他性质，则需要正式的射电星 VLBI 天体测量观测。

本文的工作证明了利用测地观测中搭载式相位参考模式观测射电星的可行性，未来可以利用这种方式，将此模式作为正式的射电星 VLBI 天体测量观测的先导试验，验证所选射电星的流量强度可否被观测到；也可以在大量的测地观测中穿插此类搭载式射电星观测，以充分利用观测时间，作为射电星 VLBI 天体测量的补充，丰富射电星 VLBI 观测的数据样本，为光学和射电参考架连接做贡献。

致谢：感谢上海天文台 VLBI 相关处理中心和澳大利亚 LBA 相关处理中心在数据相关处理方面的协助。

参考文献：

[1] Gaia Collaboration. VizieR online data catalog：Gaia EDR3 [DB/OL]. (2020-11-24) [2023-04-17]. https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020yCat.1350....0G/abstract.

[2] LINDEGREN L, HERNÁNDEZ J, BOMBRUN A, et al. Gaia data release 2-the astrometric solution [J]. Astronomy and Astrophysics, 2018, 616：A2.

[3] KOVALEVSKY J, LINDEGREN L, HEMENWAY P D, et al. The Hipparcos Catalogue as a realisation of the extragalactic reference system [J]. Astronomy and Astrophysics, 1997, 323：620-633.

[4] PLAVIN A V, KOVALEV Y Y, PETROV L Y. Dissecting the AGN disk-jet system with joint VLBI-Gaia analysis [J]. The Astrophysical Journal, 2019, 871(2)：143.

[5] XU S J, ZHANG B, REID M J, et al. Comparison of Gaia DR2 parallaxes of stars with VLBI astrometry [J]. The Astrophysical Journal, 2019, 875(2)：114.

[6] WOREK T F. Evidence of a third star orbiting the eclipsing binary δ Librae [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2001, 113(786)：964-969.

[7] DERVIŞOǦLU A, PAVLOVSKI K, LEHMANN H, et al. Evidence for conservative mass transfer in the classical Algol system δ Librae from its surface carbon-to-nitrogen abundance ratio [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 481(4)：5660-5674.

[8] RICHARDS M T, WALTMAN E B, GHIGO F D, et al. Statistical analysis of 5 year continuous radio flare data from β Persei, V711 Tauri, δ Librae, and UX Arietis [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2003, 147(2)：337-361.

[9] BOPP B W, FEKEL F. HR 1099：a new bright RS CVn variable [J]. The Astronomical Journal, 1976, 81(9)：771-774.

[10] LANDIS H J, HALL D S. BS 1099：a bright variable similar to the radio star UX Arietis [J]. Information Bulletin on Variable Stars, 1976, 1：1113-1114.

[11] FEKEL Jr F C. Spectroscopy of V711 Tauri (=HR 1099)：fundamental properties and evidence for starspots [J]. The Astrophysical Journal, 1983, 268(1)：274-281.

[12] RANSOM R R, BARTEL N, BIETENHOLZ M F, et al. Possible corotation of the milliarcsecond radio structure of the close binary HR 1099 [J]. The Astrophysical Journal, 2002, 572(1): 487-502.

[13] AYRES T R, LINSKY J L. Outer atmospheres of cool stars. X-HR 1099 at quadrature [J]. The Astrophysical Journal, 1982, 254: 168-174.

[14] ROBINSON R D, AIRAPETIAN V S, MARAN S P, et al. Observing stellar coronae with the Goddard High Resolution Spectrograph. II. The RS CVn binary system HR 1099 [J]. The Astrophysical Journal, 1996, 469: 872-883.

[15] 吴德, 舒逢春, 甘江英, 等. 87 颗南天区射电源的高灵敏度天体测量 [J]. 中国科学：物理学 力学 天文学, 2023, 53(4): 103-115.
WU D, SHU F C, GAN J Y, et al. High sensitivity astrometry of 87 radio sources in the southern hemisphere [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2023, 53(4): 103-115.

[16] 冯浩通, 舒逢春, 何旋. 上海佘山 VLBI 站的钟差补偿精度分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(8): 1148-1153.
FENG H T, SHU F C, HE X. Accuracy analysis of clock offset compensation of Shanghai Sheshan VLBI station [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(8): 1148-1153.

[17] DELLER A T, BRISKEN W F, PHILLIPS C J, et al. DiFX-2: a more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123(901): 275-287.

[18] DELLER A T, TINGAY S J, BAILES M, et al. DiFX: a software correlator for very long baseline interferometry using multiprocessor computing environments [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, 119(853): 318-336.

[19] GREISEN E W. AIPS, the VLA, and the VLBA [M] // HECK A. Information handling in astronomy-historical vistas. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006: 109-125.

[20] 王玲玲, 苟伟. 时频系统故障预测 [J]. 天文研究与技术, 2022, 19(4): 386-395.
WANG L L, GOU W. Timing system failure prediction [J]. Astronomical Research & Technology, 2022, 19(4): 386-395.

[21] SHEPHERD M C, PEARSON T J, TAYLOR G B. DIFMAP: an interactive program for synthesis imaging [J]. Bulletin of the Astronomical Society, 1994, 26(2): 987-989.

[22] LESTRADE J F, MUTEL R L, PHILLIPS R B, et al. Detection of a sub-milliarcsecond radio component in the RS CVn system HR 1099 [J]. The Astrophysical Journal, 1984, 282: L23-L26.

[23] TRIGILIO C, UMANA G, MIGENES V. VLBI observations of a strong radio flare in HR 1099 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1993, 260(4): 903-907.

[24] DRAKE S A, SIMON T, LINSKY J L. A survey of the radio continuum emission of RS Canum Venaticorum and related active binary systems [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1989, 71: 905-930.

[25] FELDMAN P A, TAYLOR A R, GREGORY P C, et al. Discovery of strong radio flaring from HR 1099 [J]. The Astronomical Journal, 1978, 83: 1471-1484.

[26] JONES K L, STEWART R T, NELSON G J, et al. Three-dimensional gyrosynchrotron modelling of radio star spectra: quiescent flux and polarization from the RS CVn binary HR 1099 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1994, 269(4): 1145-1151.

[27] CONDON J J, CONDON M A, GISLER G, et al. Strong radio sources in bright spiral galaxies. II-Rapid star formation and galaxy-galaxy interactions [J]. The Astrophysical Journal, 1982, 252: 102-124.

[28] EKERS R D. Non-thermal radio astronomy [J]. Astroparticle Physics, 2014, 53: 152-159.

[29] MATTEWS L D. Radio stars [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2019, 131(995): 1-32.

[30] REID M J, SCHNEPS M H, MORAN J M, et al. The distance to the center of the Galaxy-H2O maser proper motions in Sagittarius B2 (N) [J]. The Astrophysical Journal, 1988, 330: 809-816.

[31] BOBOLTZ D A, FEY A L, JOHNSTON K J, et al. Astrometric positions and proper motions of 19 radio stars [J]. The Astronomical Journal, 2003, 126(1): 484-493.

[32] BOBOLTZ D A, FEY A L, PUATUA W K, et al. Very large array plus pie town astrometry of 46 radio stars [J]. The Astronomical Journal, 2007, 133(3): 906-916.

[33] LUNZ S, HEINKELMANN R, ANDERSON J, et al. Gaia-VLBI: phase-referencing continuum emission observations of optically bright stars with the VLBA (planned proposal) [C]// Proceedings of the Journées. 2019: 49-54.

Observation of Radio Stars Del Lib and HR 1099 Using Piggy-back Phase Referencing Mode in Geodetic Observation

Chen Wen[1,2,3], Wang Min[1,3]

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China, Email: chenwen@ynao.ac.cn;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)

Abstract: The GCRF (Gaia Celestial Reference Frame) based on Gaia astrometric data has systematic differences from the ICRF (International Celestial Reference Frame) based on VLBI (Very Long Baseline Interferometry). An external independent evaluation of the data from Gaia is required to link optical and radio reference frame. Celestial bodies with both optical and radio radiation are generally used to link the two frames, quasars are used at the dark end (magnitude $G \geqslant 15$), and radio stars are used at the bright end ($G \leqslant 13$). It is very difficult to apply for the ordinary VLBI observations, so we try to focus on some geodesic observations that can use phase reference mode to observe radio stars in geodesic observations. In order to test the feasibility of this kind of observation, we use piggy-back phase referencing mode in geodetic observation of IVS (The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) and LBA (Large Baseline Array), and select Del Lib and HR 1099 as the targets. Our observations have obtained the VLBI images, flux densities and single-epoch coordinates of these two radio stars, and the coordinate accuracy is higher than that of the previous work; at the same time, we also combine the data of the previous work to fit parallax and proper motion of the two radio stars. Our results are consistent with the results of the previous VLBI work and Gaia's, and some of the accuracy is higher. Our work verify the feasibility of observing radio stars with piggy-back phase referencing mode in geodetic observation, and lay a certain foundation for the subsequent enrichment of VLBI astrometric samples of radio stars and linking of optical and radio reference frames.

Key words: Very Long Baseline Interferometry; radio star; astrometry; proper motion; parallax